Plant Prod., 2026, 49(2), 339-354
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2024.47929.2205
Received: 14 September 2024
Accepted: 10 December 2024

Plant Productions

Research Article

Feasibility and capacity assessment of nano-organosilica production from rice husk and its characterization

Fatemeh Nickkhoy Shaldehi [1], Reza Ebrahimi Gaskarei[1*]

1. Department of Soil Sciencs, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran

Citation: Nickkhoy Shaldehi, F., & Ebrahimi Gaskarei, R. (2026). Feasibility and capacity assessment of nano-organosilica production from rice husk and its characterization. *Plant Productions*, 49(2), 339-354.

Abstract

Introduction

The area under rice cultivation in Iran is about 700,000 hectares. The outer husk of paddy is the main waste of rice mills and about 20% of the dry weight of this waste material is silica. The silica in this waste can be extracted and returned to the rice fields as a fertilizer. The necessity of conducting this research is related to the insufficient amount of silicon in the soil of some rice fields, the role of silicon in increasing the resilience of plants to environmental stresses, and the goal of this research is to investigate the possibility of producing nanosilica from the outer husk of rice, estimate its capacity, and return it to the rice field soil, as well as to eliminate the environmental problem resulting from the deposition of this waste in the rice mills in north of the country. Producing nano-silica from this organic waste and returning it to the rice fields is a demand-driven, innovative, and technological idea in line with sustainable agriculture and in the interest of the environment. Due to the high cost of imported silicon fertilizer and the cheap and available outer husk of rice, as well as the numerous uses of silica in industry, medicine, pharmacy, and agriculture especially in rice fields, the production of granulated nanoorganosilica from this organic waste with an economic and environmental approach is one of the goals of this applied research.

Materials and methods

This research was conducted in 1400 at the Faculty of Agricultural Sciences in University of Guilan. First, the outer husk of paddy was obtained as waste from paddy factory in Jirdeh village in Shaft city of Gilan province and after adding normal hydrochloric acid (HCl) to it and heating it gently in a sand bath, heating continued in an electric furnace at 700 degrees Celsius until only amorphous nanosilica remained. Semicrystalline nanosilica was obtained from the interaction of the remaining amorphous nanosilica with potassium nitrate. Field emission scanning electron microscopy (FESEM), X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopy

* **Corresponding Author:** Reza Ebrahimi Gaskarei
E-mail: rezaebrahimi@guilan.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

(FTIR) analyses were used to identify and confirm the nanostructure of amorphous silica and semicrystalline silica particles. In addition, the capacity to retain the outer husk of paddy in active paddy mills was estimated randomly by survey method using a questionnaire.

Results and Discussion

Based on the results of this study, the successful synthesis of nano-silica particles from rice paddy husk was confirmed using the applied characterization techniques. The findings further demonstrated that approximately 100 g of nano-organosilica could be produced from every 1,000 g of dry rice paddy husk, corresponding to a conversion efficiency of about 10%. Considering that rice is cultivated on approximately 700,000 ha of paddy fields nationwide, the annual production potential of nano-organosilica from rice husk is estimated to be approximately 84,000 tons. These results highlight the considerable potential of rice husk, an abundant agricultural by-product, as a sustainable and value-added source for the large-scale production of nano-organosilica.

Conclusion

In line with sustainable agriculture, by extracting silica from rice mill waste, the silica deficit of those rice fields in the country whose soil silicon is insufficient can be met. Therefore, this technology should be created alongside the system for converting paddy to white rice in rice mills as a side production line, and the silica produced should be made available to rice farmers in the same area to add to the soil of their rice fields.

Keywords: Circular economy, Sustainable agriculture, Amorphous nanosilica, Semicrystalline nanosilica

تولیدات گیاهی، ۱٤۰۵، ٤۹(۲)، ۳۳۹-۳٥٤
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2024.47929.2205
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

امکان‌سنجی و ظرفیت‌سنجی تولید نانوارگانو سیلیس از پوسته بیرونی شلتوک و تعیین ویژگی‌های آن

فاطمه نیکخوی شالدهی [۱]، رضا ابراهیمی گسکریی [۱] *

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

سطح زیر کشت برنج در ایران حدود ۷۰۰ هزار هکتار است. پوستهٔ بیرونی شلتوک برنج، مهم‌ترین پسماند کارخانجات شالیکوبی است که حدود ۲۰ درصد وزن خشک آن را سیلیس تشکیل می‌دهد. سیلیس موجود در این پسماند قابلیت استخراج داشته و می‌تواند به‌عنوان کود سیلیسی به خاک شالیزارها بازگردانده شود. ضرورت انجام این پژوهش، مربوط به کمبود سیلیسیم در خاک برخی از شالیزارهای کشور، نقش سیلیسیم در افزایش تاب‌آوری گیاهان در برابر تنش‌های محیطی و همچنین ضرورت مدیریت زیست محیطی پسماندهای کارخانجات شالیکوبی است. هدف این تحقیق، بررسی امکان تولید نانوسیلیس از پوسته بیرونی شلتوک برنج، برآورد ظرفیت تولید آن، بازگرداندن آن به خاک شالیزارها و کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انباشت این پسماند در محوطهٔ کارخانجات شالیکوبی شمال کشور است. تولید نانوسیلیس از این پسماند آلی و بازگرداندن آن به شالیزارها، ایده‌ای تقاضامحور، نوآورانه و فناورانه در راستای تحقق کشاورزی پایدار و حفاظت از محیط زیست است. از سوی دیگر، با توجه به هزینه بالای تأمین سیلیسیم وارداتی، در دسترس بودن و قیمت پایین پوستهٔ بیرونی شلتوک و همچنین کاربردهای گسترده سیلیس در صنایع، پزشکی، داروسازی و کشاورزی، به‌ویژه در کشت برنج، تولید نانوارگانوسیلیس گرانوله از این پسماند با رویکردی اقتصادی و زیست محیطی، از اهداف این پژوهش کاربردی است. این پژوهش در سال ۱٤۰۰ در دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان انجام شد. در ابتدا، پوسته بیرونی شلتوک به‌عنوان پسماند از یک کارخانه شالیکوبی واقع در دهستان جیرده، شهرستان شفت، استان گیلان تهیه شد. سپس با افزودن اسید هیدروکلریک نرمال (HCl) و اعمال حرارت ملایم در حمام شن، نمونه‌ها آماده‌سازی شدند. در ادامه، نمونه‌ها در کوره الکتریکی و در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند تا تنها نانوسیلیس بی‌شکل (آمورف) باقی بماند. همچنین، از برهم‌کنش نانوسیلیس آمورف با نیترات پتاسیم، نانوسیلیس نیمه بلوری تولید شد. به‌منظور شناسایی و تأیید نانوساختار سیلیس تولید شده، از آزمون‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)، پراش پرتو ایکس (XRD) و طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR) استفاده شد. علاوه بر این، ظرفیت تولید و میزان پوسته بیرونی شلتوک باقی‌مانده در کارخانجات شالیکوبی فعال، به‌صورت تصادفی و با استفاده از روش پیمایشی و پرسشنامه برآورد شد. نتایج این پژوهش نشان داد که نانو بودن ذرات سیلیس تولید شده از پوستهٔ بیرونی شلتوک برنج با استفاده از

نویسنده مسئول: رضا ابراهیمی گسکریی
رایانامه: rezaebrahimi@guilan.ac.ir

آزمون‌های مذکور تأیید شد. همچنین مشخص شد که از هر ۱۰۰۰ گرم پوسته بیرونی شلتوک خشک، حداقل ۱۰۰ گرم نانوارگانوسیلیس قابل تولید است. بر این اساس، ظرفیت تولید نانوسیلیس از پوسته بیرونی شلتوک حاصل از حدود ۷۰۰ هزار هکتار شالیزار کشور، نزدیک به ۸٤ هزار تن در سال برآورد می‌شود. در راستای کشاورزی پایدار، استخراج سیلیس از پسماند کارخانجات شالیکوبی می‌تواند نیاز آن دسته از شالیزارهای کشور را که با کمبود سیلیسیم در خاک مواجه هستند، تأمین کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود فناوری تولید نانوسیلیس به‌عنوان یک خط تولید جانبی در کنار سیستم تبدیل شلتوک به برنج سفید در کارخانجات شالیکوبی ایجاد شود تا سیلیس تولیدشده در اختیار شالیکاران همان منطقه قرار گیرد و به‌عنوان منبع سیلیسیم به خاک شالیزارهای آنان بازگردانده شود. این راهکار علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از انباشت پسماند، باعث افزایش بهره‌وری منابع، کاهش وابستگی به واردات کودهای سیلیسی و همچنین تقویت پایداری نظام تولید برنج در کشور خواهد شد.

کلید واژه‌ها: اقتصاد چرخشی، کشاورزی پایدار، نانوسیلیس بی‌شکل، نانوسیلیس نیمه بلوری

مقدمه

سطح زیر کشت برنج در ایران حدود ۷۰۰ هزار هکتار است و سیلیسیم یکی از عناصر ضروری برای رشد و عملکرد مطلوب این گیاه به شمار می‌رود. غلظت سیلیسیم در اندام‌های مختلف برنج می‌تواند بین ۱ تا بیش از ۱۰ درصد متغیر باشد (Dobermann, 2000). گیاه برنج سیلیس را به صورت اسید مونوسیلیک (H_4SiO_4) جذب کرده و این عنصر نقش مهمی در بهبود رشد، افزایش استحکام ساقه و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی نظیر شوری، خشکی، تنش دمایی، سمیت فلزات، بیماری‌ها و آفات ایفا می‌کند (Bimasri *et al.*, 2018).

در اثر کشت مداوم برنج و خروج مداوم بقایای گیاهی از مزرعه، سرعت برداشت سیلیسیم از خاک بیشتر از سرعت جایگزینی طبیعی آن بوده و در بسیاری از شالیزارها، به ویژه خاک‌های قدیمی و شدیداً هوازده، کاهش سیلیسیم قابل جذب گزارش شده است (Dobermann, 2000).

برنج با تولید ۶ تن شلتوک در هکتار، حدود ۲۳۰ تا ۴۷۰ کیلوگرم سیلیسیم را از خاک جذب می‌کند که بخش عمده آن در کاه و کلش و پوسته شلتوک تجمع می‌یابد (Bimasri *et al.*, 2018). در شرایطی که بقایای گیاهی و پوسته شلتوک به خاک بازگردانده نمی‌شوند، توازن سیلیسیم خاک منفی شده و به تدریج حاصلخیزی خاک و عملکرد برنج تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Dobermann, 2000). از این‌رو، بازیافت سیلیسیم از بقایای برنج در راستای کشاورزی پایدار اهمیت ویژه‌ای دارد.

پوسته بیرونی شلتوک برنج، یکی از مهم‌ترین پسماندهای صنایع شالیکوبی بوده و حدود ۲۰ درصد وزن شلتوک را تشکیل می‌دهد. این ماده حاوی حدود ۲۰ درصد سیلیس آمورف (بی‌شکل) بوده و ارزش تغذیه‌ای قابل توجهی برای دام و طیور ندارد (Angelova *et al.*, 2011). از این رو، پوسته شلتوک به عنوان یک زیست‌توده ارزان و در دسترس، منبع مناسبی برای تولید سیلیس و نانوسیلیس محسوب می‌شود (Wu *et al.*, 2013; Kordi *et al.*, 2024). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که امکان استخراج سیلیس با خلوص بالا از پوسته شلتوک با استفاده از روش‌های مختلفی نظیر سل-ژل، استخراج قلیایی، هیدروترمال و عملیات حرارتی وجود دارد و نانوسیلیس حاصل دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مطلوب برای کاربردهای کشاورزی و صنعتی است (Liou, 2004; Chen *et al.*, 2011; Adam *et al.*, 2011; Daud *et al.*, 2020; Putranto *et al.*, 2021; Hasri *et al.*, 2023; Kumari *et al.*, 2023; Sasidhar *et al.*, 2023; Aprilia *et al.*, 2023).

افزون بر کاربردهای صنعتی و پزشکی، نانوسیلیس می‌تواند به عنوان منبعی مؤثر برای تأمین سیلیسیم در شالیزارها مورد استفاده قرار گیرد و نسبت به خاکستر پوسته شلتوک، اثرات مطلوب‌تری بر استحکام ساقه، تحمل

شرایط غرقاب و افزایش عملکرد برنج داشته باشد (Singh *et al.*, 2024). با توجه به حجم بالای پسماند حاصل از صنایع شالیکوبی در شمال کشور و ضرورت توسعه رویکردهای اقتصاد چرخشی و کشاورزی پایدار، استفاده از پوسته شلتوک برنج برای تولید نانوسیلیس می‌تواند علاوه بر کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انباشت این پسماند، به تولید یک محصول با ارزش افزوده بالا و بازگرداندن بخشی از سیلیسیم خارج‌شده از خاک به چرخه تولید کمک کند (Tayeh *et al.*, 2023; Zamanialaei *et al.*, 2023; Kordi *et al.*, 2024).

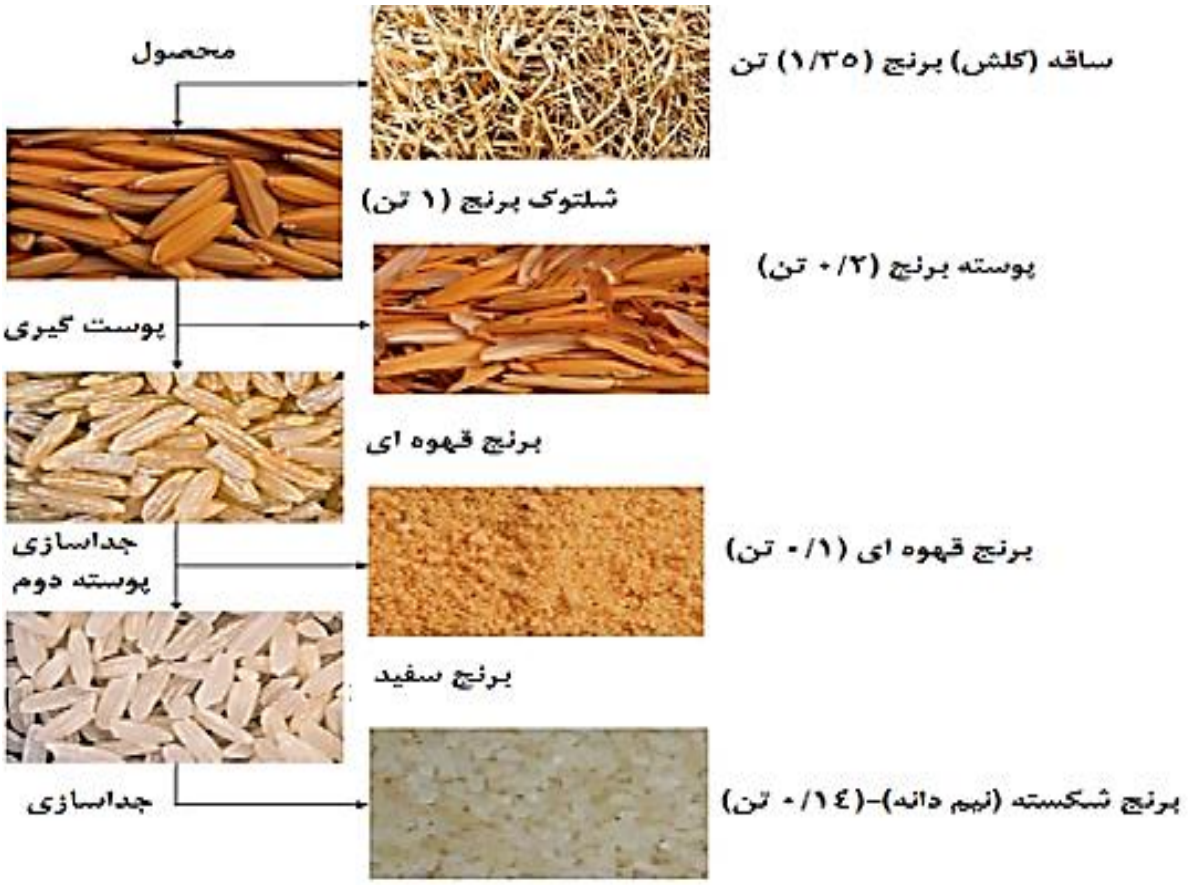
لذا هدف کلی از انجام این تحقیق، بررسی امکان تولید نانوسیلیس از پوسته بیرونی شلتوک برنج و برآورد ظرفیت آن است. به دلایل مختلف مانند در دسترس بودن پوسته بیرونی شلتوک، گران بودن کود سیلیسیم‌دار وارداتی و نقش مفید سیلیسیم بر رشد و نمو گیاهان بویژه افزایش مقاومت برنج در برابر آفات، بیماری‌ها و تنش های محیطی، این پژوهش کاربردی با هدف تولید نانوسیلیس از پوسته بیرونی شلتوک انجام شد.

مواد و روش‌ها

به استناد محصولات اصلی و فرعی کارخانجات شالیکوبی (شکل ۱)، درصد سیلیس در اندام‌های گیاه برنج (جدول ۱)، نتایج آزمایش خاک در پروژه استانی در سال‌های قبل از ۱۴۰۰ و اطلاعات خاک شالیزارهای مستخرج از گزارش منتشر نشده (جدول ۲)، برای انجام این پژوهش، دهستان جیرده در شهرستان شفت انتخاب شد. مهمترین محصول زراعی این دهستان، برنج است. میانگین دمای سالانه جیرده ۱۶/۳ درجه سلسیوس و متوسط بارندگی سالانه ۱۳۶۰ میلی‌متر است (Parhizkar and Cerda, 2023). این محدوده دارای رژیم رطوبتی یودیک و رژیم حرارتی ترمیک است. طبق بررسی‌هایی که در طرح پژوهشی بررسی تغذیه گیاه برنج در شالیزارهای استان با همکاری گروه خاکشناسی دانشگاه گیلان و مؤسسهٔ تحقیقات برنج کشور با حمایت مالی استانداری و بسیج کشاورزی و منابع طبیعی استان انجام شد خاک شالیزارهای این محدوده از توابع شهرستان شفت نیز از جمله شالیزارهایی هستند که سیلیس خاک آنها ناکافی است و در اغلب سال‌ها، دچار ورس می شوند. در این تحقیق، سیلیس از پوسته شلتوک (شکل ۲ الف) رقم هاشمی، استخراج سپس خالص‌سازی و پس از تبدیل به نانو ذره با افزودن رس ریز چسبنده با دستگاه گرانولار به فرم گرانوله در خواهد آمد تا مصرف آن در شالیزار، راحت‌تر باشد. برای انجام این پژوهش ابتدا در محدوه دهستان جیرده در شهرستان شفت در غرب گیلان از یک شالیزار در حال بهره‌برداری با قدمت بیش از ۸۰ سال با مشخصات جغرافیایی 37^{o} ۱۱,۲۳ تا ۱۰,۲۶ ^{o} ۳۷ عرض شمالی و 49^{o} ۲۹,۰۳ تا 49^{o} ۲۹,۰۴ طول شرقی، یک نمونه خاک مرکب از عمق سطحی با اوگر، تهیه و سیلیس آن تعیین شد. برای اطمینان از ناکافی بودن سیلیس، نمونه خاک تهیه شده از شالیزار این دهستان به مجتمع آزمایشگاهی پارس ارسال و مقدار سیلیس آن اندازه‌گیری شد.

استخراج سیلیس و تبدیل آن به نانوسیلیس

پس از انتقال پوسته شلتوک به آزمایشگاه شیمی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان، ابتدا آن را با هیدروژن کلراید ۱۰ درصد به مدت ۲ ساعت روی هیتر در زیر هود آزمایشگاهی جوشانده پس با آب مقطر شستشو و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در آون خشک، سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس در کوره الکتریکی حرارت داده شد تا ذرات نانوسیلیس بی شکل به فرم پودر سفید مایل به خاکستری (شکل ۲ ب)، تبدیل و در ادامه نانوسیلیس بی‌شکل با محلول نیترات پتاسیم ۰/۵ نرمال با هدف کریستاله شدن به مدت ۱ ساعت هم زده شد. به کمک کاغذ صافی نمونه فیلتر و پودر باقی‌مانده به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون خشک سپس در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۸ ساعت در کوره قرار گرفت تا نانوسیلیس متخلخل نیمه بلوری تشکیل شود (Wang *et al.*, 2012).



شکل۱-تصویر محصولات اصلی و جانبی مختلف طی فرایند تبدیل شلتوک به برنج سفید
Figure 1. Main and by-products during the process of converting paddy into white rice

جدول۱- سطح بهینه و نقطه بحرانی سیلیسیم در بافت گیاه برنج
Table 1. Optimum level and critical point of Si in rice plant organs

مرحله رشد	اندام گیاه	حد کفایت(درصد)	حد بحرانی(درصد)
پنجه زنی تا سنبله	برگ بالایی	8 - 10	<5

جدول۲-ویژگی‌های خاک شالیزار روستای جیرده شفت در غرب گیلان

Table 2. Paddy soil properties of rice field in Jirdeh, Shaft, west of Guilan

Si (mg/kg)	Cu (mg kg^{-1})	Zn (mg g^{-1})	K (mg kg^{-1})	P (mg kg^{-1})	OC %	pH	EC (ds m^{-1})	Sample Code No.
23	3.17	0.43	62	48	5.488	6.87	0.46	1-11
37	4.88	0.34	62	50	2.836	7.11	0.75	4-10
26	2.57	0.992	133	22	3.967	6.18	0.86	7-10
11	5.13	0.848	170	15	4.206	6.39	0.59	9-10*
39	4.02	0.592	149	25	2.368	5.93	0.69	9-11
28	4.04	0.262	212	32	4.396	7.44	0.96	34-5
26	7.22	0.464	146	47	3.939	7.30	0.71	34-6
37	5.94	0.762	101	37	6.658	6.02	0.76	34-7
36	5.18	0.206	140	40	1.666	6.24	0.35	35-10
34	3.96	0.37	175	41	2.407	6.85	0.58	38-4
25	8.35	0.076	220	55	6.073	7.22	0.89	38-5
21	7.86	0.808	215	62	4.123	7.52	0.63	38-6
33	1.3	0.05	284	75	3.382	7.35	0.88	38-7
36	3.72	0.018	152	46	6.19	6.72	0.71	39-10
32	3.42	0.584	255	55	3.694	6.30	0.81	42-7
25	2.04	0.292	141	60	4.396	6.30	0.81	42-8
24	5.12	0.602	144	32	5.41	6.03	1.04	43-10
26	4.56	0.470	377	61	5.02	6.66	1.10	44-7
26	4.02	0.26	210	60	5.995	6.51	0.88	44-8
29	9.18	0.322	201	46	5.605	6.52	0.66	44-9
32	2.82	0.886	320	26	4.786	7.12	0.9	44-10
29	5.96	1.34	386	38	2.446	7.42	0.6	44-11
27	2.44	1.02	192	39	4.045	6.14	0.8	44-12
24	4.17	0.220	137	19	4..435	6.28	0.47	45-12
38	1.24	0.250	96	22	3.226	5.59	0.274	46-4
38	2.2	0.436	111	28	3.538	5.83	0.28	46-5
22	3.11	0.066	183	23	1.822	5.97	0.21	46-6
27	2.94	0.164	105	17	2.29	5.40	1.84	46-7
29	2.38	0.344	74	13	3.226	5.51	0.48	46-8
35	1.47	0.612	163	29	3.07	5.56	0.30	46-9
33	7.48	0.446	109	26	3.226	5.83	0.21	46-10
30	2.44	0.13	107	23	3.694	5.79	0.24	46-11
35	3.22	0.38	132	7	2.524	6.08	0.35	46-12
32	8.07	0.428	144	52	5.761	6.69	0.77	47-2

تعیین درصد سیلیس در نمونه تولیدی

مقدار سیلیس در نمونه تولید شده با روش رنگ آبی مولیبدن مبتنی بر روش ویور و همکاران (Yang *et al.*, 2015) در طول موج ۶۵۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر در مجتمع آزمایشگاهی پارس تعیین شد. در این روش، حجم معین از عصاره نمونه حاوی حدود ۵ گرم سیلیسیم به یک لوله سانتریفیوژ ۱۵ میلی‌لیتری اضافه و با ۰/۲۵ میلی‌لیتر هیدروکلراید، اسیدی و با ۲ میلی‌لیتر پارا مولیبدات آمونیوم ۰/۳ مولار مخلوط و حجم آن با آب مقطر به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. پس از گذشت ۴۵ دقیقه برای تشکیل رنگ، میزان جذب در طول موج ۶۵۰ نانومتر

توسط دستگاه اسپکتروفتومتردر مجتمع آزمایشگاهی پارس، اندازه‌گیری شد.

آنالیز تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

آنالیز تبدیل فوریه مادون قرمز یکی از آنالیزهای پرکاربرد در حوزه شناسایی ترکیبات و پیوندهای موجود در مواد آلی و معدنی و زیر مجموعه آنالیزهای طیف‌سنجی می‌باشد (Analytical Methods Committee, 2021). اساس این آنالیز در بررسی پرتوی‌های مادون قرمز جذب شده توسط نمونه مورد آنالیز است. با مطالعه طیف مادون قرمز خروجی دستگاه می‌توان پیوندهای شیمیایی، برهم کنشهای مولکولی و به خصوص گروه‌های عاملی مواد را شناسایی کرد. همچنین این روش، شناخته شده‌ترین روش برای مطالعه اصلاحات سطحی صورت گرفته بر روی نانوذرات است. هزینه پایین و سرعت بالای این آنالیز باعث کاربرد گسترده آن در رشته‌ها و صنایع گوناگون مانند شیمی، پلیمر، داروسازی، مهندسی مواد، فناوری نانو، زیست فناوری، آب و محیط زیست و صنایع نفت و گاز شده است (Kassem *et al.*, 2023). برای بررسی نمونه‌های پودری، پودر ماده مورد نظر با پودر نمک پتاسیم برمید در هاون با محصول مخلوط سپس مخلوط دو پودر درون یک قالب مخصوص ریخته شد و تحت خلأ نسبی با استفاده از یک پرس، پودرها به شکل یک قرص با ابعاد مشخص تبدیل شد. به دلیل عدم جذب نور مادون قرمز توسط پودر نمک پتاسیم برمید از این ماده برای آماده‌سازی نمونه پودری استفاده می‌شود (Sravan Kumar *et al.*, 2015).

آنالیز طیف سنج پراش اشعه ایکس (XRD)

آنالیز پراش پرتو ایکس روشی غیر تخریبی است که اطلاعات کلی درباره ساختار فازی بلوری را گزارش می‌دهد (Surdu and Gyorgy, 2023). هر ساختار بلوری، الگوی پرتو ایکس مشخصه خود را دارا است که می‌تواند برای مشخص نمودن هویت آن مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، از این آنالیز به منظور تهیه الگوی پراش مواد و بررسی خصوصیاتی مانند هندسه شبکه بلوری، تعیین کیفی ترکیبات مجهول بلوری و میزان بلورینگی نانو ذرات سیلیس تولیدی از طریق پیرولیز نانوذرات استفاده شد (Singh and Agrawal, 2012).

میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی یکی از روش‌های بسیار مناسب برای بررسی مورفولوژی نمونه‌های مختلف است (Ali *et al.*, 2023). در این تحقیق پرتوهای الکترونی سطح نمونه مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آشکارسازها، اطلاعات مفیدی حاصل شد (Lewczuk and Szyryńska, 2021). در جزئیات بیشتر، آشکارسازها، الکترون‌های حامل اطلاعات را جذب کرده و سیگنال الکترونیکی تولید کردند که این سیگنال به صورت عکس دیجیتال ذخیره و پردازش شد. از این آنالیز به منظور تعیین پراکندگی نانو ذرات سیلیس تولیدی و تأثیر شستشو با اسید و حذف ناخالصی‌ها بر پراکندگی نانوذرات استفاده شد. در این روش نمونه‌های نانو ذرات سیلیس تولید شده ابتدا باید رسانا شوند که این کار با استفاده از پوشش نازک از طلا انجام شد (Teerthe and Kerur, 2019).

گرانوله کردن ارگانوسیلیس نانو

پودر نانوسیلیس تولید شده با دستگاه گرانول ساز با افزودن رس به گرانول تبدیل شد. این تغییر فرم در کود، استفاده از آن را برای مصرف‌کننده، تسهیل می کند.

جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

پس از اطمینان از امکان تولید نانوسیلیس از پوسته بیرونی شلتوک برنج و انجام آنالیزهای مربوطه، ظرفیت‌سنجی تولید نانوسیلیس از پوسته بیرونی شلتوک برنج نیز مورد بررسی قرارگرفت. جامعه آماری این تحقیق شامل ۱۵۰۰ کارخانه شالیکوبی فعال بود لذا از بین کارخانه‌های فعال، ۲۵۰ کارخانه به به عنوان نمونه انتخاب و با استفاده از پرسشنامه به روش پیمایشی، اطلاعات مربوط به وزن پوسته بیرونی شلتوک در هر کارخانه به

ازای هر تن شلتوک جمع آوری شد. تحقیق از نظر ماهیت، کمی و از نظر هدف، کاربردی بود. برای تعیین روایی پرسشنامه به عنوان ابزار تحقیق از نظر متخصصین و به منظور تعیین پایایی تحقیق از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد. نرمال‌بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی و پس از اطمینان از نرمال بودن، مقدار نهایی پوسته بیرونی تولید شده و همبستگی بین سؤالات برای تعیین ضریب آلفای کرونباخ، محاسبه شد.

نتایج و بحث

میانگین ویژگی‌های خاک شالیزار آزمایش شده با سه تکرار در زیر ارائه شده است (جدول ۳). خاک با ۴۲ درصد رس، ۳۶ درصد سیلت،۲۲ درصد شن دارای بافت رسی می باشد. علاوه بر این ویژگیها، مقدار سیلیسیم خاک، به عنوان عنصر اصلی این تحقیق، نیز اندازه‌گیری شد که میانگین سه تکرار ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بدست آمد (جدول ۳) که بسیار کمتر از حد بحرانی سیلیسیم در خاک شالیزار (۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است (Paye *et al.*, 2018) لذا مجدد تایید شد که سیلیس خاک شالیزارهای این منطقه ناکافی است و دلیل آن تخلیه سالانه سیلیس از خاک و عدم جایگزینی آن است. این نمونه خاک با کد "۱۰-۹ " در جدول ۲ نیز درج شده است. یکی از منابع تامین سیلیس، می‌تواند سیلیس موجود در پوسته بیرونی شلتوک برنج (پسماند کارخانجات شالیکوبی) است. استخراج سیلیس از پسماند کارخانجات شالیکوبی در محدوده دهستان جیرده این مزیت را دارد که کود نانو سیلیس تولید شده از پسماند کارخانجات در همان محدوده جغرافیایی، هم قابلیت تولید دارد هم قابلیت مصرف، لذا هزینه حمل و نقل ماده اولیه و عرضه محصول سنتز شده به بازار مصرف، کاهش می یابد. صنعت استخراج سیلیس از پوسته بیرونی شلتوک قابلیت اجرا در کارخانجات شالیکوبی استان گیلان را دارد و لازم است در خصوص عملیات اجرایی آن، پژوهش های لازم انجام شود تا امکان تولید تجاری آن فراهم و مشکل سریع‌تر رفع شود.

درصد سیلیسیم در ماده سیلیسیم‌دار تولید شده

مقدار SiO_2 در نانوسیلیس تولید شده ۸۱ درصد بدست آمد. این مقدار به رقم برنج هم وابسته هست (Sankar *et al.*, 2016). در مطالعه‌ای گزارش شد که مقدار سیلیس در خاکستر پوسته شلتوک (شکل ۲ پ) ۹۰ درصد و پس از انجام مراحل استخراج ۹۶/۵۳ درصد و با تبدیل سیلیس استخراج شده به نانوسیلیس، مقدار آن به ۹۸/۸۰ درصد رسید (Rafiee *et al.*, 2012). در مطالعه دیگری نیز محققین، نانو سیلیس با خلوص بالاتر از ۹۸ درصد بدست آوردند (Nguyen *et al.*, 2019).

خاک اغلب شالیزارها در گیلان از نظر کربن آلی وضعیت خوبی دارند. پتاسیم این خاک پایین است و پتاسیم پایین نیز مشکلات ناشی از ناکافی بودن سیلیسیم در شالیزار مانند ورس یا خوابیدن قبل از مرحله رسیدن را، تشدید می کند. پتانسیل اکسید و احیا در خاک این شالیزار بسیار پایین است که دلیل اصلی آن غرقاب طولانی مدت،کربن آلی بالا و کاهش شدت اکسیژن محلول در آب خاک است.

گرانوله کردن نانو ارگانوسیلیس

نانوسیلیس تولید شده (شکل ۲ ت) با افزودن رس ریز با دستگاه گرانولار، به گرانول (شکل ۲ ث) تبدیل، تا مصرف آن تسهیل شود.

جدول۳- ویژگی‌های خاک شالیزار در روستای جیرده شفت در غرب گیلان

Table 3. Paddy soil properties in Jiredeh village, Shaft, west of Guilan

Zn (mg kg^{-1})	Si (mg kg^{-1})	K (mg kg^{-1})	P (mg kg^{-1})	TN (%)	OC (%)	Eh (mV)	pH	EC (ds m^{-1})
2	10	120	16.3	0.21	2.44	-64.17	7.02	0.9



شکل ۲- (الف) پوسته شلتوک؛ (ب) پودر پوسته شلوک؛ (پ) خاکستر پوسته برنج؛ (ت) نانوذرات سیلیس؛ (ث) نانوسیلیس گرانوله شده

Figure 2. (A) Rice husk (RH); (B) Rice husk powder; (C) Rice husk ash; (D) Nanosilica particles; (E) Granulated nanosilica

نتایج آنالیز طیف سنج فروسرخ تبدیل فوریه

آماره‌های طیف‌سنج فروسرخ تبدیل فوریه نمونه‌های SiO_2 (a)، SiO_2(b) و SiO_2(c) به ترتیب مربوط به سیلیس تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک بدون اسیدشویی، نانوسیلیس بی شکل تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک و نانوسیلیس متخلخل نیمه بلوری تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک است (شکل ۷). در طیف فروسرخ نمونه‌های SiO_2 (a) و SiO_2 (b)، پیک مربوط به OH در ۳۴۳۶ cm^{-1} مشاهده شد. پیک‌های مشاهده شده در حدود ۱۱۰۰ cm^{-1} و ۸۰۰ cm^{-1} بترتیب به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن گروه Si-O-Si مربوط است. پیک مربوط به Si-O در 469 cm^{-1} دیده می‌شود (Adam *et al.*, 2011). همان‌طور که در طیف آنالیز تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه‌های SiO_2 (a) و SiO_2 (b) مشاهده می‌شود با وجود اینکه در نمونه SiO_2 (a) فرایند اسیدشویی صورت نگرفته اما طیف فوریه مادون قرمز این نمونه تفاوت چندانی با نمونه‌ی SiO_2 (b) که اسیدشویی شده، ندارد. احتمالا فرایند اسید شویی باعث حذف ناخالصی‌های فلزی می‌شود (Guo *et al.*, 2021) و از آن جایی که از طیف FTIR، برای شناسایی گروه‌های عاملی استفاده می‌شود با آنالیز تبدیل فوریه مادون قرمز نمی‌توان به حضور ناخالصی‌های فلزی در نمونه SiO_2 (a) پی برد. در طیف FTIR نمونه SiO_2 (c)، پهن شدگی پیک در 1097 cm^{-1} و تیزتر شدن پیک در 788 cm^{-1} و 623 cm^{-1} به برهمکنش بین KNO_3 و SiO_2 مربوط است (Yildirim *et al.*, 2015).

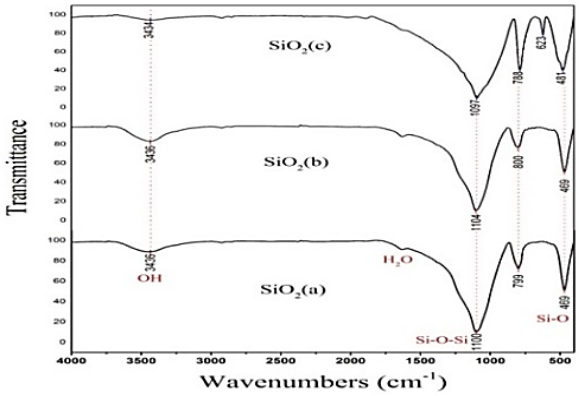
نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس

الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های SiO_2 (b) و SiO_2 (c) (شکل ۸) حضور پیک پهن در الگوی XRD نمونه‌ی SiO_2 (b) در $2\Theta=۲۵^{\circ}$ نشان دهنده‌ی یک فرم معمول برای نانوذرات سیلیس بی‌شکل است و عدم وجود هر گونه ساختار بلوری منظم را تأیید می‌کند. نمونه‌ی SiO_2 (c) بلورینگی بهتری نسبت به نمونه‌ی SiO_2 (b) دارد که نشان دهنده‌ی این است که پیرولیز نانوذرات سیلیس برهمکنش داده شده با محلول KNO_3 در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به افزایش بلورینگی نانو ذرات منجر شده است (Vinoda *et al.*, 2022).

نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی

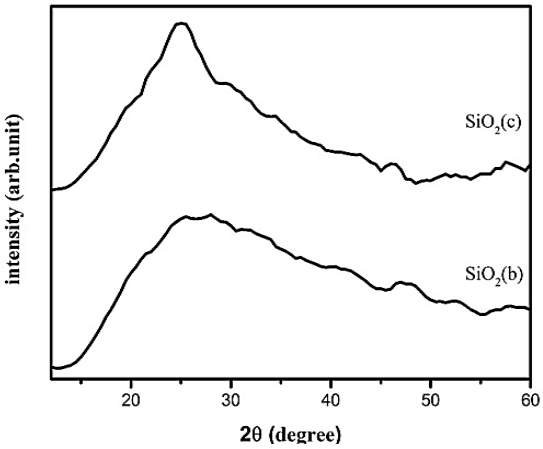
تصاویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نمونه‌های SiO_2 (a) و SiO_2 (b) نشان می‌دهد که پراکندگی نانوذرات در نمونه SiO_2 (b) بهتر از نمونه SiO_2 (a) است (شکل ۹). با توجه به این‌که نمونه‌های SiO_2 (a) و SiO_2 (b) تقریباً در شرایط یکسان سنتز شده‌اند، اما در نمونه SiO_2 (b) قبل از فرایند پیرولیز، پوسته بیرونی شلتوک با محلول HCl شستشو داده شده است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که شستشو با اسید با

حذف ناخالصی‌ها باعث تشکیل نانوذراتی با پراکندگی بهتر می‌شود (Wang *et al.*, 2012).



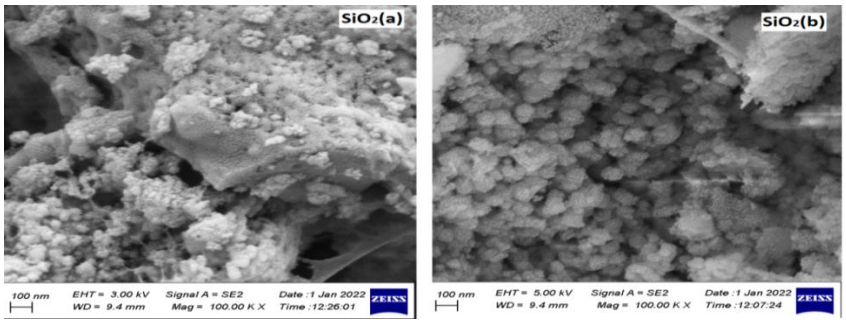
شکل۷- طیف‌سنج فروسرخ تبدیل فوریه نمونه‌های SiO2(a)، SiO2(b) و SiO2(c)

Figure 7. Fourier transforms infrared spectrometer of SiO_2 (a), SiO_2 (b) and SiO_2(c) samples



شکل ۸- الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های SiO2(b) و SiO2 (c)

Figure 8. X-ray diffraction patterns of SiO_2 (b) and SiO_2 (c) samples



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نمونه‌های SiO2(a) و SiO2(b)

Figure 9. Field emission scanning electron microscope images of SiO_2 (a) and SiO_2 (b) samples

ظرفیت‌سنجی تولید نانو سیلیس از پسماند شالیکوبی‌ها

در این تحقیق ضریب آلفای کرونباخ، به عنوان ابزاری برای سنجش میزان تک بعدی بودن نگرش‌ها و نیز به عنوان واریانس

کل پرسش‌ها، محاسبه شد که نتایج حاصل با ضریب ۰/۸۹ نشان از پایایی مناسب ابزار تحقیق را داشت. به عبارت دیگر، میزان بالای ضریب آلفای کرونباخ، نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین سؤالات بود. به ازای هر تن شلتوک برداشت شده، ۱۳۵۰ کیلوگرم کلش در مزرعه و ۲۰۰ کیلوگرم پوسته بیرونی شلتوک در کارخانه شالیکوبی بر جای می ماند بعبارت دیگر در فرایند تبدیل شلتوک به برنج سفید، از هر تن شلتوک، ۲۰۰ کیلوگرم پوسته بیرونی (پسماند) و ۱۰۰ کیلوگرم پوسته درونی (سبوس نرم) بر جای می ماند. در کشور ما تنها استفاده‌ای که پوسته درونی شلتوک (سبوس نرم) در مقیاس تجاری دارد مصرف آن به عنوان خوراک دام و طیور است اما با توجه به این که حدود ۸۰ درصد پوسته بیرونی شلتوک برنج، سلولز، لیگنوسلولز و لیگنین است و حدود ۲۰ درصد آن را سیلیس بی‌شکل تشکیل می‌دهد، ارزشی در تغذیه دام و طیور ندارد و در صورتیکه برای تولید کود سیلیسم دار استفاده شود ارزش افزوده قابل توجهی خواهد داشت. در این تحقیق سعی شد تا از طریق دستیابی به نظر و دیدگاه کارخانه‌های فعال شالیکوبی، به این سوال نیز پاسخ داده شود که آیا کارخانه‌های تبدیل شلتوک به برنج سفید در ساماندهی پوسته بیرونی شلتوک برنج و تامین نیاز شالیزارها به سیلیسیم همکاری می کنند یاخیر؟ که پس از تجزیه و تحلیل اطلاعات پرسشنامه‌ای، این نتیجه حاصل شد که پوسته بیرونی شلتوک برنج می‌تواند مشابه طلای سفید عمل کرده و بخش قابل توجهی از سیلیسیم مورد نیاز شالیزارهای محدوده همان کارخانه را تأمین کند. ارزیابی کارایی فرآیند بازیافت پوسته بیرونی شلتوک برنج حاوی سیلیس آمورف مشخص کرد که قابلیت تولید این سیلیس با درجه خلوص بالا وجود دارد. نتایج نشان داد که فرآیند پیش تیمار اسیدی، مقدار زیادی از ناخالصی‌های فلزی پوسته برنج، به ویژه پتاسیم (نرخ حذف ≤ ۹۰ درصد وزنی) را حذف کرد. در همین حال، فرآیند شستشو اثر بسیار ضعیفی بر سیلیسیم داشت و به همین دلیل سیلیسیم با درصد مناسب استخراج شد. فرآیند احتراق پوسته بیرونی برنج بسیار پایدار بود و راندمان احتراق به ۹۹/۵ درصد رسید. پوسته بیرونی شلتوک برنج ذرات سفید با خلوص ۸۱ درصد وزنی و محتوای کربن نسوخته کمتر از ۰/۶ درصد وزنی داشت. شلتوک برنج غنی‌ترین ریزساختار و بالاترین سطح ویژه و حجم منافذ را دارا است. نتایج نشان داد که مزایای غیر قابل انکاری در احتراق پوسته بیرونی شلتوک برنج برای تولید نانوسیلیس آمورف وجود دارد. استفاده از فرآیند پیش تیمار اسیدی باعث افزایش عملکرد احتراق و بهبود کیفیت پوسته بیرونی شلتوک برنج شد. نانوسیلیس مشتق شده از پوسته بیرونی شلتوک برنج سودمند است. با تغییر پارامترهای پردازش، نانوذرات سیلیس را می‌توان برای کاربردهای خاص دیگر نیز تولید کرد. علاوه بر این، نانوسیلیس تولید شده در این تحقیق می تواند اثرات مفیدی مانند افزایش رسانایی روزنه ای در گیاهان که منجر به بهبود قابل توجه نرخ خالص فتوسنتز می شود (Tayeh *et al*., 2021) یا افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی که منجر به کاهش سطح استرس سلولی می شود و کاهش در سنتز پرولین را به همراه داشته باشد (Wu, 2013). با این حال، از آنجایی که پاسخ به نانوسیلیس تولید شده با توجه به اندازه، شکل و خواص فیزیکوشیمیایی نانوسیلیس می تواند متفاوت باشد، این متغیرها باید در آزمایش‌های مزرعه ای بررسی شوند تا مؤثرترین روش‌های استفاده از نانوسیلیس تولید شده از پوسته بیرونی شلتوک برای بهبود رشد گیاهان تعیین شود. نتایج حاصل از بررسی آمادگی شالیکاران برای مصرف نانوسلیس در شالیزار در زیر گزارش شده است (شکل ۱۰).

C1: بین پتانسیل کارخانه‌های شالیکوبی و سازگاری شالیکاران با کودهای حاوی نانوسیلیس رابطه مثبت وجود دارد.

C2: بین پتانسیل کارخانه‌های شالیکوبی و آمادگی شالیکاران برای انتشار کود سیلیسیم‌دار رابطه مثبت وجود دارد.

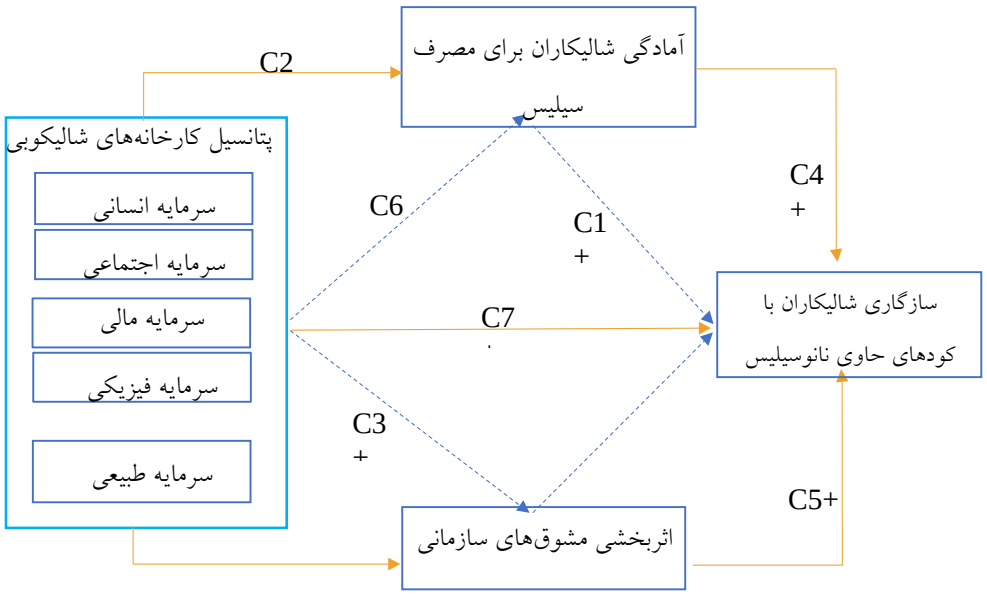
C3: بین پتانسیل کارخانه‌های شالیکوبی و اثربخشی مشوق‌های سازمانی درک‌شده توسط شالیکاران رابطه مثبت وجود دارد.

C4: بین آمادگی شالیکاران برای مصرف کود سیلیسیم‌دار و سازگاری آنها با کودهای حاوی سیلیس رابطه مثبت وجود دارد.

C5: بین اثربخشی مشوق‌های سازمانی درک‌شده توسط شالیکارن و سازگاری آنها با نانوسیلیس رابطه مثبت وجود دارد.

C6: آمادگی برای مصرف کود سیلیسیم‌دار به طور مثبت بر رابطه بین کارخانه‌های شالیکوبی وشالیکاران تأثیر می گذارد.

C7: مشوق‌های سازمانی به طور مثبت بر رابطه بین پتانسیل کارخانه‌های شالیکوبی و سازگاری شالیکاران با کودهای حاوی نانوسیلیس تأثیر می گذارد.



شکل ۱۰- مدل مفهومی آمادگی شالیکاران برای مصرف نانوسیلیس در راستای کشاورزی پایدار

Figure 10. Conceptual model of farmer's readiness on nanosilica adaptation for sustainable agriculture

نتیجه‌گیری

پوسته بیرونی شلتوک برنج از جمله فرآورده های فرعی صنایع تبدیل شلتوک به برنج سفید است که دارای ۲۰ درصد سیلیس است. نتایج این پژوهش تایید می کند که می‌توان هر سال از این پسماند، سیلیس یا نانوسیلیس، سنتز و خالص‌سازی کرد و بعنوان کود، به خاک شالیزار برگرداند. همچنین این نانو سیلیس یا نانوذره برای ساخت کاتالیست، نانو حامل دارویی، پوشش پایدار نیز قابل استفاده است. با توجه به اینکه میزان مصرف برنج با رشد جمعیت بیشتر خواهد شد، لذا می توان پیش‌بینی کرد که تولید شلتوک و در نتیجه حجم پوسته بیرونی شلتوک بعنوان پسماند کارخانجات شالیکوبی روند افزایشی خواهد داشت لذا استفاده از آن در صنایع مختلف از نظر اقتصادی مهم است. با این اقدام مشکل مربوط به دفع این پسماند و آلودگی زیست محیطی ناشی از دپو شدن آن در محوطه کارخانجات شالیکوبی نیز مرتفع می شود. به طور کلی دورریزهای گیاهی به سه روش قابل استفاده مجدد (اقتصاد چرخشی) هستند که روش استخراج ماده موثره آنها، روش نوین تری است. انرژی در کشور ما ارزان و ماده اولیه این تحقیق تقریبا رایگان و سالانه قابل دسترس است. همچنین حمل و نقل محصول تولیدی در مقایسه با ماده اولیه این تحقیق، آسان‌تر و بازیافت این دورریز نیز به نفع محیط زیست است لذا راه اندازی این صنعت درکارخانجات شالیکوبی، کاری اقتصادی، مساله محور و در راستای کشاورزی پایدار است. باید از پوسته بیرونی شلتوک، سیلیس آن را استخراج و بمنظور رفع نیاز برنج به سیلیسیم، آن را به خاک شالیزارها برگرداند.

سپاس گزاری

از پارک علم و فناوری گیلان، مرکز رشد کشاورزی گیلان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان، شرکت شهرک‌های صنعتی و صنایع کوچک گیلان، بنیاد ملی نخبگان گیلان، و از جناب آقای زارع مدیر کارخانه

شالیکوبی در شهر سنگر، بخاطر ایجاد پایلوت تولید نانوسیلیس از پوسته بیرونی شلتوک در کارخانه شالیکوبی، سپاسگزاریم.

Refrences

Adam, F., Chew, T. S., & Andas, J. (2011). A simple template-free sol–gel synthesis of spherical nanosilica from agricultural biomass. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 59, 580–583. https://doi.org/10.1007/s10971-011-2531-7

Agricultural products statistics. (2015). Ministry of Agriculture Jihad Publications. [In Persian].

Ali, A., Zhang, N., & Santos, R.M. (2023). Mineral Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the Fundamentals, Advancements, and Research Directions. *Applied Sciences*, 13, 12600. https://doi.org/10.3390/app132312600

Analytical Methods Committee, AMCTB No. 106. (2021). Fourier transform infrared spectroscopic analysis of organic archaeological materials: background paper. *Analytical Methods*, 13, 2997-3000. https://doi.org/10.1039/D1AY90064A

Angelova, D., Uzunov, I., Uzunova, S., Gigova, A., & Minchev, L. (2011). Kinetics of oil and oil products adsorption by carbonized rice husks. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 306-311. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.114

Aprilia, S., Rosnelly, C. M., Zuhra., Fitriani, F., Akbar, E. H., Raqib, M., Rahmah, K., Amin, A., & Baity, R. A. (2023). Synthesis of amorphous silica from rice husk ash using the sol–gel method: Effect of alkaline and alkaline concentration. *Materials Today: Proceedings*, 87, 225-229. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.403

Bimasri, J., Budianta, D., Marsi., & Harun, U. (2018). Bioavailability of Silica on Paddy Soils with Various Land Aging in Musi Rawas South Sumatera of Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 68, 01008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186801008

Chen, W., Yao, X., Cai, K., & Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, 142, 67-76. https://doi.org/10.1007/s12011-010-8742-x

Daud, F. D. M., Azmy, N. A. M., Mahmud, M. S., Sariffudin, N., & Zaki, H. H. M. (2020). Preparation of nanosilica powder using rice husk via precipitation method. In *Materials Science Forum* (Vol. 1010, pp. 501-507). Trans Tech Publications Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1010.501

Dobermann, A. (2000). Rice: Nutrient disorders & nutrient management. Int. Rice Res. Inst..

Guo, W., Li, G., Zheng, Y., & Li, K. (2021). Nano-silica extracted from rice husk and its application in acetic acid steam reforming. *RSC Advances*, *11*(55), 34915-34922. https://doi.org/10.1039/D1RA05255A

Hasri, Putri, S. E., Anwar, M., & Askar, M. (2023). Synthesis of rice husk nanosilica using the hydrothermal method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1209(1), 012011. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1209/1/012011

Kassem, A., Abbas, L., Coutinho, O., Opara, S., Najaf, H., Kasperek, D., & Tiquia-Arashiro, S. (2023). Applications of Fourier Transform-Infrared spectroscopy in microbial cell biology and environmental microbiology: advances, challenges, and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1304081. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1304081

Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M. I., & Ahmadikhah, A. (2024). Rice husk at a glance: from agro-industrial to modern applications. *Rice Science*, 31(1), 14-32. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005

Kumari, M., Singh, K., Dhull, P., Lohchab, R. K., & Haritash, A. K. (2023). Sustainable green approach of silica nanoparticle synthesis using an agro-waste rice husk. *Nature Environment & Pollution Technology*, 22(1). https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i01.046

Lewczuk, B., & Szyryńska, N. (2021). Field-emission scanning electron microscope as a tool for large-area and large-volume ultrastructural studies. *Animals*, 11(12), 3390. https://doi.org/10.3390/ani11123390

Liou, T.H. (2004). Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk. *Materials Science and Engineering*, 364, 313-323. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.045

Moraes, C. A., Fernandes, I. J., Calheiro, D., Kieling, A. G., Brehm, F. A., Rigon, M. R., Berwanger Filho, J. A., Schneider, I. A., & Osorio, E. (2014). Review of the rice production cycle: by-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. *West Magazine & Research*, 32(11), 1034-48. https://doi.org/10.1177/0734242X14557379

Nguyen, H. X., Dao, N. T. T., Nguyen, H. T. T., & Le, A. Q. T. (2019). Nanosilica synthesis from rice husk and application for soaking seeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 266, 012007.

Parhizkar, M., & Cerda, A. (2023). Modelling effects of human-caused fires on rill detachment capacity based on surface burning of soils in forest lands. *Journal of Hydrology*, 624, 129893. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129893

Paye, W., Tubana, B., Harrell, D. L., Babu, T., Kanke, Y., & Datnoff, L. E. (2018). Determination of critical soil silicon levels for rice production in Louisiana using different extraction Procedures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49, 1-12. https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1495731

Putranto, A. W., Abida, S. H., Sholeh, A. B., & Azfa, H. T. (2021). The potential of rice husk ash for silica synthesis as a semiconductor material for monocrystalline solar cell: a review. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 733(1), 012029.

Rafiee, E., Shahebrahimi, S., Feyzi, M., & Shaterzadeh, M. (2012). Optimization of synthesis and characterization of nanosilica produced from rice husk. *International Nano Letters*, 2, 29. https://doi.org/10.1186/2228-5326-2-29

Sankar, S., Sharma, S. K., Kaur, N., Lee, B., Kim, D. Y., Lee, S., & Jung, H. (2016). Biogenerated silica nanoparticles synthesized from sticky, red, and brown rice husk ashes by a chemical method. *Ceramics International*, 42(4), 4875-4885. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.172

Sasidhar, B., Malathi, P., Rahale, C. S., Gnanachitra, M., & Sharmila, D. (2023). Synthesis and Characterization of Mesoporous Nanosilica Derived from Rice Husk Ash. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 3526-3532.

Singh, G., Chowdhary, K., & Sharma, S. (2024). Elucidating the prospects of paddy straw as a potential source of nanosilica: A road map towards sustainable agriculture, bioeconomy and entrepreneurship. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141607. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141607

Singh, V., & Agrawal, H. (2012). Qualitative soil mineral analysis by EDXRF, XRD and AAS probes. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(12), 1796-1803. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.07.002

Sravan Kumar, S., Manoj, P., & Giridhar, P. (2015). Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis, chlorophyll content and antioxidant properties of native and defatted foliage of green leafy vegetables. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8131-8139. https://doi.org/10.1007/s13197-015-1959-0

Surdu, V. A., & Győrgy, R. (2023). X-ray diffraction data analysis by machine learning methods. A review. *Applied Sciences*, 13(17), 9992. https://doi.org/10.3390/app13179992

Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Alaskar, A. (2021). Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127734. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127734

Teerthe, S., & Kerur, B. (2019). Study of multielemental concentrations and Nano-micro structural morphology in myrtaceae family medicinal plants by field Emission Scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy method. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 12, 432-435. https://doi.org/10.22159/ajpcr.2019.v12i2.29054

Vinoda, B. M., & Vinuth, M. (2022). Photocatalytic degradation of toxic methyl red dye using silica nanoparticles synthesized from rice husk ash. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 5(06). https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000336

Wang, W., Martin, J. C., Fan, X., Han, A., Luo, Z., & Sun, L. (2012). Silica nanoparticles and frameworks from rice husk biomass. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *4*(2), 977-981. https://doi.org/10.1021/am201619u

Wu, J. W., Shi, Y., Zhu, Y. X., Wang, Y. C., & Gong, H. L. (2013). Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review . *Pedosphere*, 23, 815-825.

Yang, H., Li, C., Wei, C., Li, M., Li, X., Deng, Z., & Fan, G. (2015). Molybdenum blue photometry method for the determination of colloidal silica and soluble silica in leaching solution. *Analytical Methods*, *7*(13), 5462-5467. https://doi.org/10.1039/C5AY01306B

Yildirim, M., Kipcak, A. S., Senberber, F. T., Asensio, M. O., Derun, E. M., S. & Piskin, S. (2015). Determination of potassium nitrate, sodium hydroxide and boric acid molar ratio in synthesis of potassium borates via hydrothermal method. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 9, 605-608.

Zamanialaei, M., Brown, M. E., McCarty, J. L., & Fain, J. J. (2023). Weather or not? The role of international sanctions and climate on food prices in Iran. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*, 998235. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.998235